

日本物理学会第75回年会

# Belle II実験 中央飛跡検出器レベル1トリガーにおける イベント発生時刻検出モジュールの開発

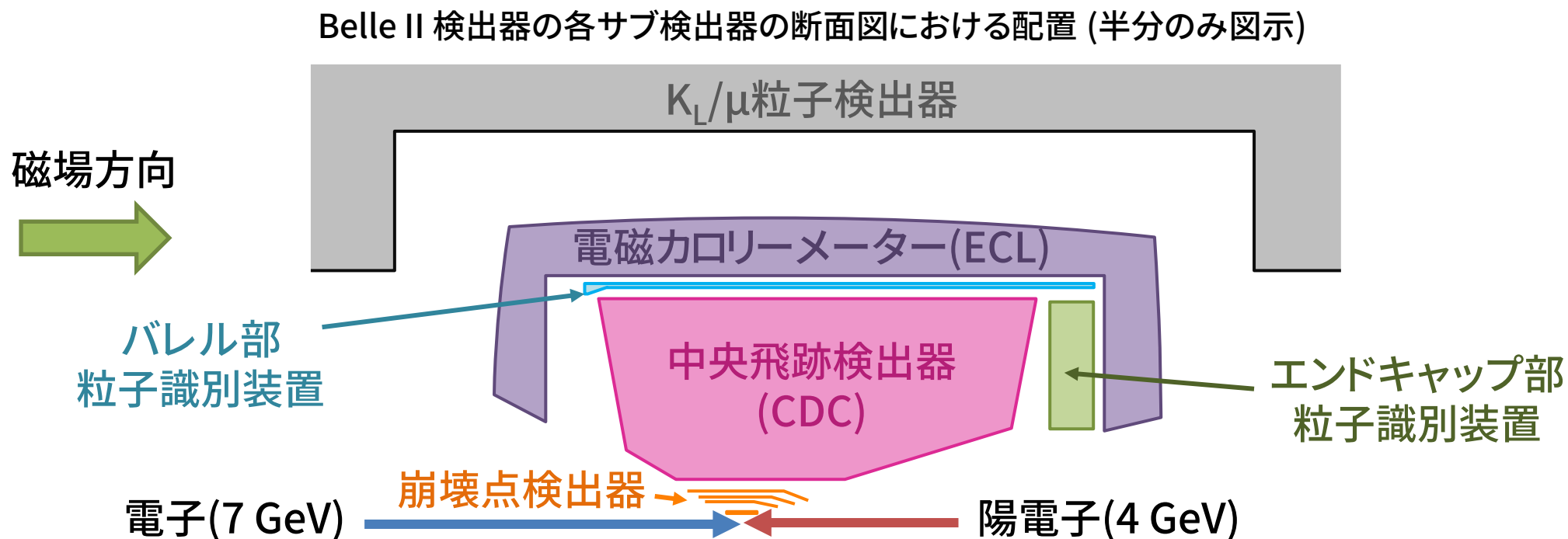
---

須江祐貴<sup>A</sup>, 飯嶋徹<sup>A,B</sup>, 岩崎義仁<sup>C</sup>, 古賀太一郎<sup>C</sup>  
名大理<sup>A</sup>, 名大KMIB<sup>B</sup>, 高工研<sup>C</sup>

# SuperKEKB / Belle II実験

- 大電流化とナノビーム方式の採用によりBelle実験の40倍に相当する瞬間ルミノシティを目標とする。
  - 設計瞬間ルミノシティ:  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 刷新された6種類のサブ検出器から構成されるBelle II検出器によってより高精度で測定する。

ルミノシティ増加に伴い約20倍増加する高バックグラウンドへの耐性が重要となる。



# Belle IIハードウェアトリガー

高い効率で物理事象を取得し、かつバックグラウンドの影響を可能な限り削減する

- 4検出器の情報をもとにデータ取得のトリガーを発行
  - メイントリガー：中央飛跡検出器、電磁カロリメータ
  - サブトリガー：バレル部粒子識別装置、 $K_L/\mu$ 粒子検出器
- FPGAによるプログラマブルな回路
- 要求
  - 興味ある物理事象への高い検出効率
  - 最大の平均トリガーレート30 kHz以下
  - 最大遅延 4.4  $\mu$ s
  - イベント発生時刻の同定精度 10 ns以下
    - 崩壊点検出器読み出し回路からの要求
    - 電磁カロリメータ(ECL)、中央飛跡検出器(CDC)、バレル部粒子識別装置がそれぞれイベント発生時刻を供給

中央積検出器ハードウェアトリガーのイベント時刻検出性能向上のために  
イベント時刻発生検出モジュール (Event Timing Finder, ETF)を新たに導入する

# CDC ETFの導入による利点

## CDCTリガー内

イベント時刻精度向上によって三次元飛跡の飛跡発生位置の同定精度が向上する。

- 三次元飛跡検出に必要なイベント時刻は、現状二次元飛跡から生成しており、15-30ns程度の時間分解能を得ている。
- 三次元飛跡再構成の精度はバックグラウンドイベントの削減に重要となる。

## ハードウェアトリガー全体

トリガーシステム全体の時刻決定精度と効率も向上する。

- Belle IIトリガー全体のイベント時刻はCDCとECLから決定され、現状では90%以上のイベントはECLによって時刻決定されている。
- トリガーに要求されるイベント時刻決定精度を十分には達成できていない。
  - 現状の輝度では要求を満たしているが、目標輝度では**効率と時間精度**向上要求が想定される。

# 中央飛跡検出器 (Central Drift Chamber, CDC)

荷電飛跡検出を目的とした**大容量ドリフトチャンバー**

磁場に平行な**Axial Wire** 6層と

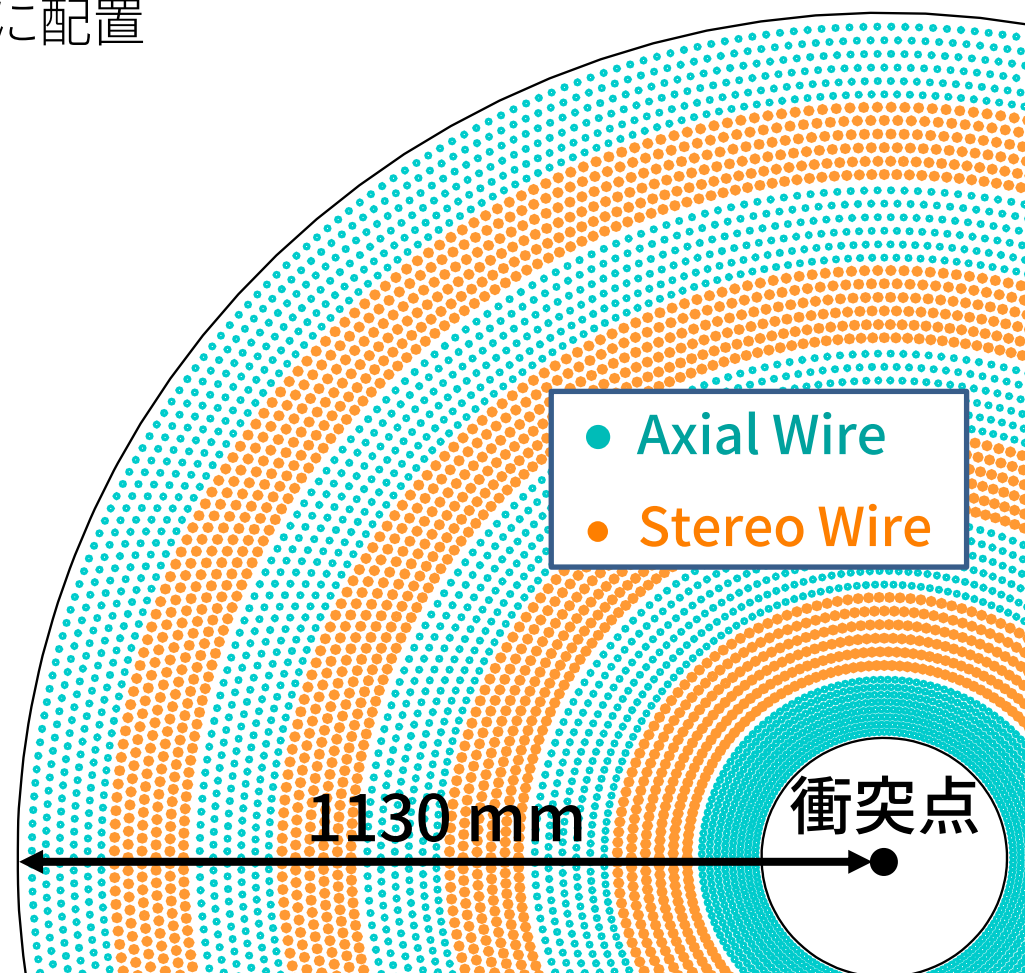
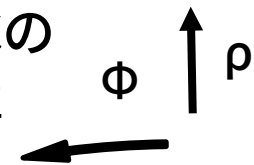
磁場に対して円周方向に角度をつけた**Stereo Wire** 6層を交互に配置

## 基本性能

- 直径: 2260 mm
- セルサイズ: 10-18 mm
- チャンバーガス: He (50%)-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50%)
- 平均ドリフト時間: 約 33 mm/ $\mu$ s
- 最大ドリフト時間: 約 600 ns (トリガーでは512nsまで考慮)

CDCトリガーではヒット位置と時間情報を用いて  
飛跡検出とイベント時刻検出を行う

$\rho$ - $\phi$ 平面におけるCDCの  
センスワイヤー配置



# CDC ハードウェアトリガー

## Track Segment

FPGA上での飛跡再構築のために、ヒットパターンを用いて“Track Segment”を構成し、二次元・三次元飛跡検出を行う。

## 二次元飛跡検出

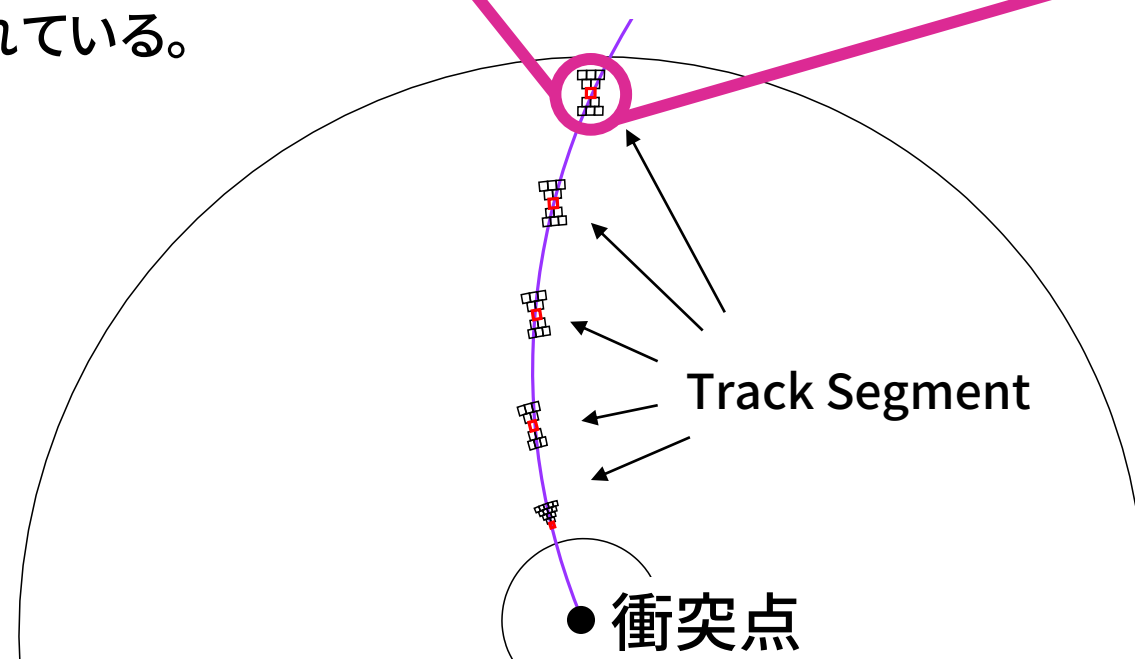
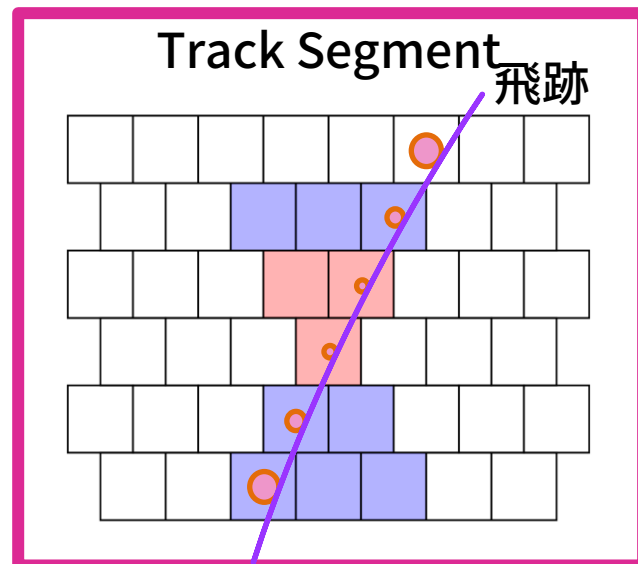
磁場と平行なワイヤーの層からのTrack Segmentのみを用いて、Hough変換による飛跡検出を行っている。

⇒すでに高い検出効率(95%以上)での動作が実現されている。

## CDCTリガーにおけるイベント時刻決定

トラックを構成するヒットの中で、**ヒット時間の早い時刻(=短いドリフト距離のヒット)**を取得することでイベント時刻を検出することができる。

⇒ 現行では約 20 nsの時間精度を達成している。



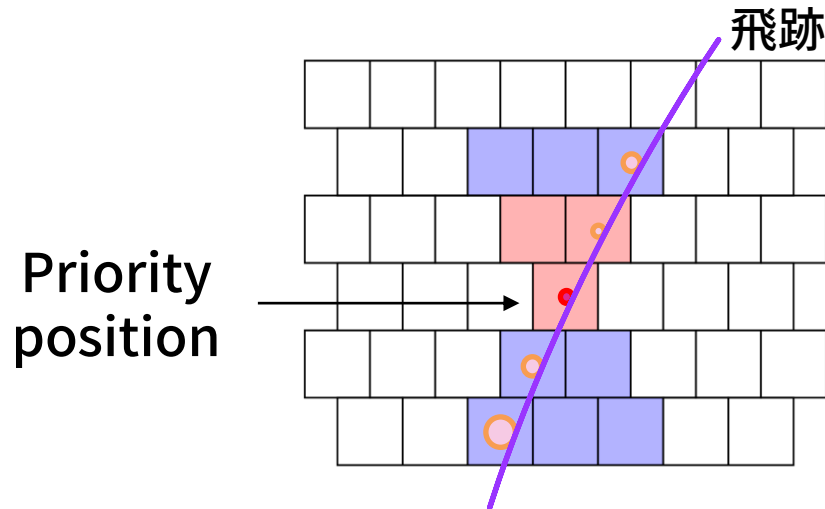
# fastest timingの導入

## 現行手法の時間情報

Track Segmentの中央に位置する  
”priority hit”という特定の層におけるヒットの  
時間情報を用いている。

= 1 Track Segment あたり 1 hitの時間情報

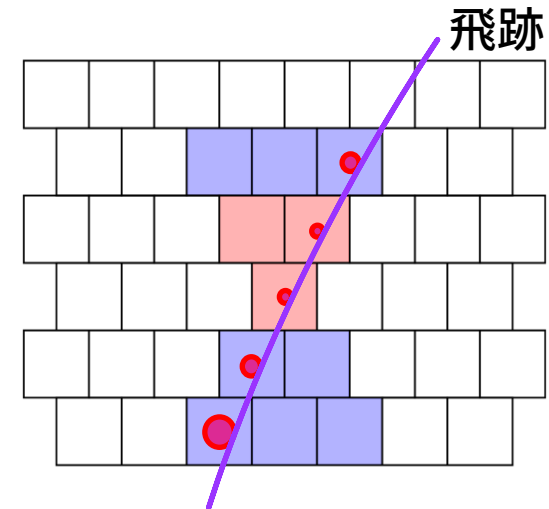
⇒ 1飛跡あたり**最大5ヒット**の時間情報から  
最も早く来た時間情報を用いる。



## 本手法の時間情報

Track Segment内の複数のヒットの中で  
最も早く起こったヒットの時間情報  
”fastest timing”を用いる。

⇒ 1飛跡あたりおよそ**20~30ヒット**の時間情報から  
最も早く起こった時間情報を用いる。

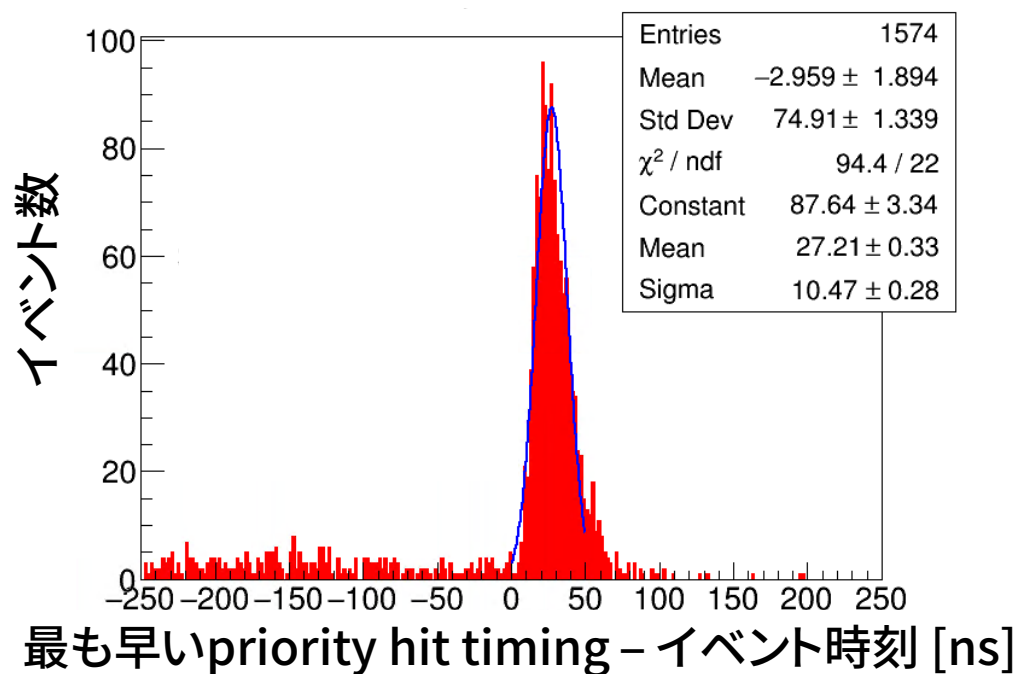


fastest timingの導入によりイベント時刻に近い時間情報を取得しやすくなる。

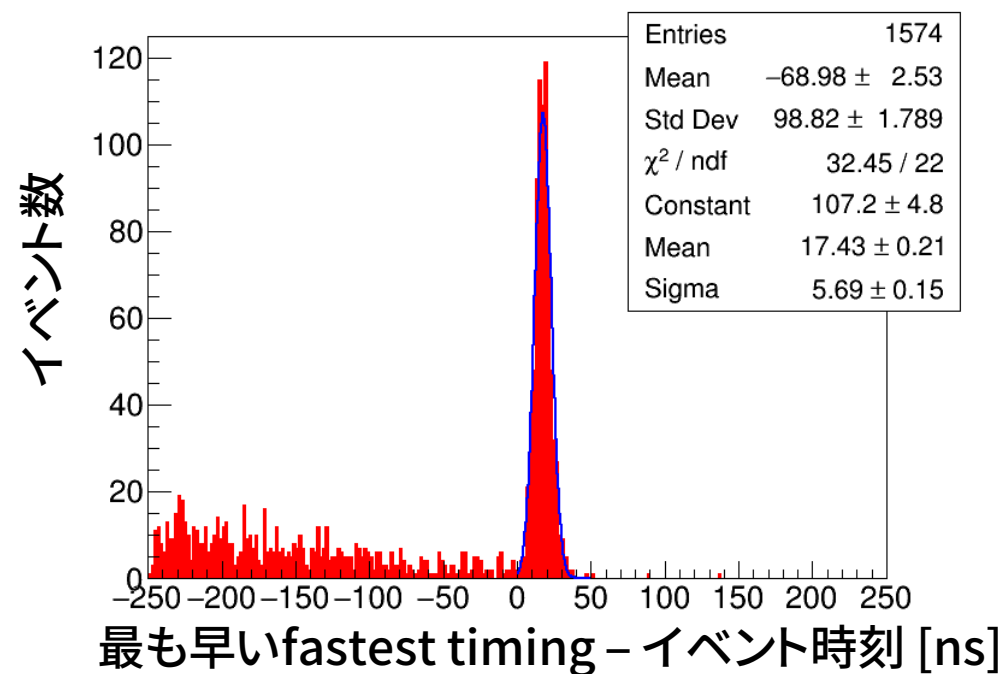
# イベント由来ではないヒットによる影響

- 実際を取得されたミュオン対事象のCDCのヒットを情報からアルゴリズムをシミュレーションし、最も早いfastest timingをイベント時刻として扱った分布を確認する。
- ピーク付近における**時間精度は向上している**。
- トラック由来ではないヒットが偶然含まれやすくなる為、多くの事象が正しいイベント時刻から離れた値となる。

## 従来手法



## fastest timingの使用



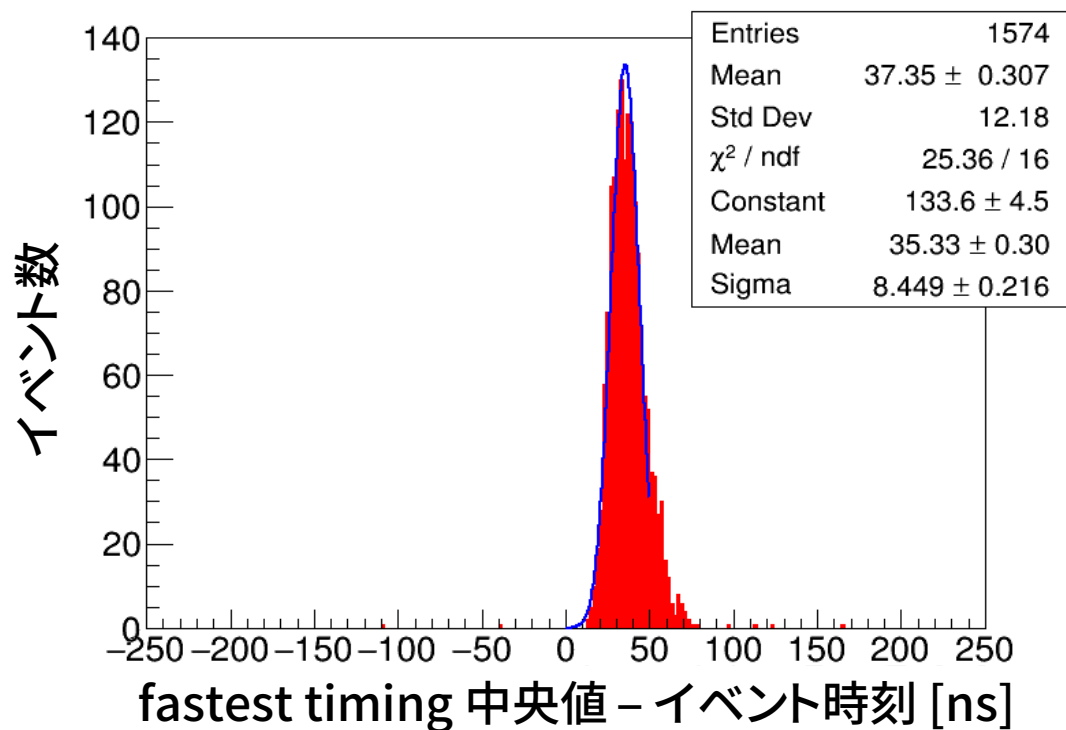
効率を上げるためには、イベント由来ではないヒットによる影響を抑える必要がある。



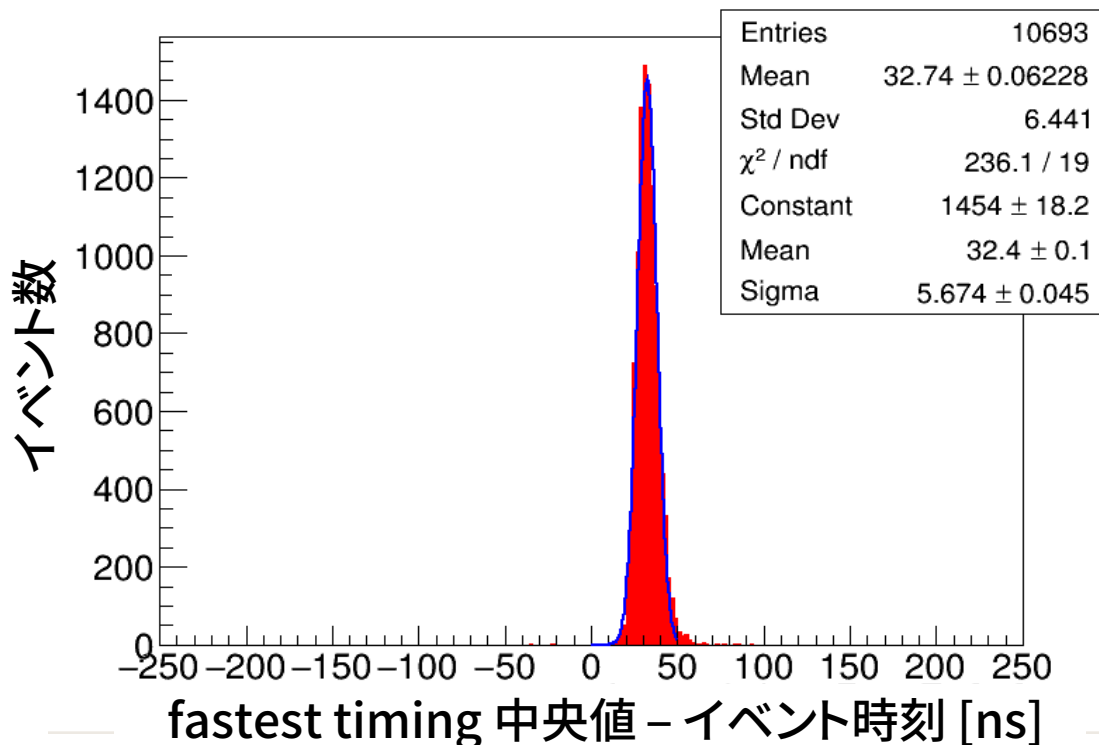
# より高効率を目指した手法の導入

- fastest timingの中で**中央値**をとることで、トラック由来でないヒットによる影響を大きく削減できる。
- ガウシアンフィットの $\sigma$ でおよそ**8.5 ns** (ミュオン対事象), **5.7 ns** (ハドロン事象)を達成可能となる。
- 95%以上は $3\sigma$ 以内の範囲に収まっており、イベント時刻から大きく外れるイベントが削減

## ミュオン対事象



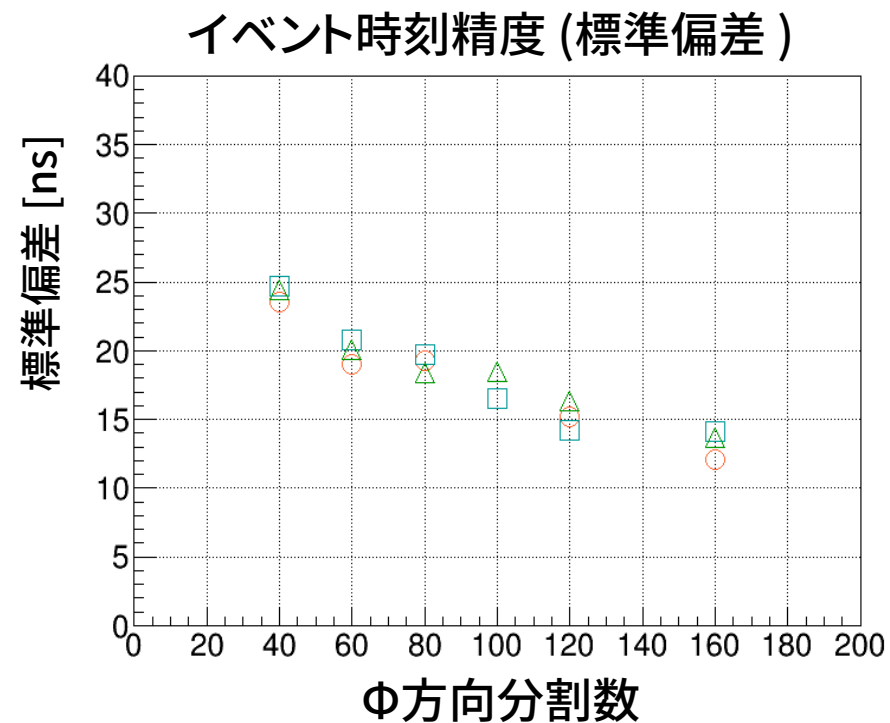
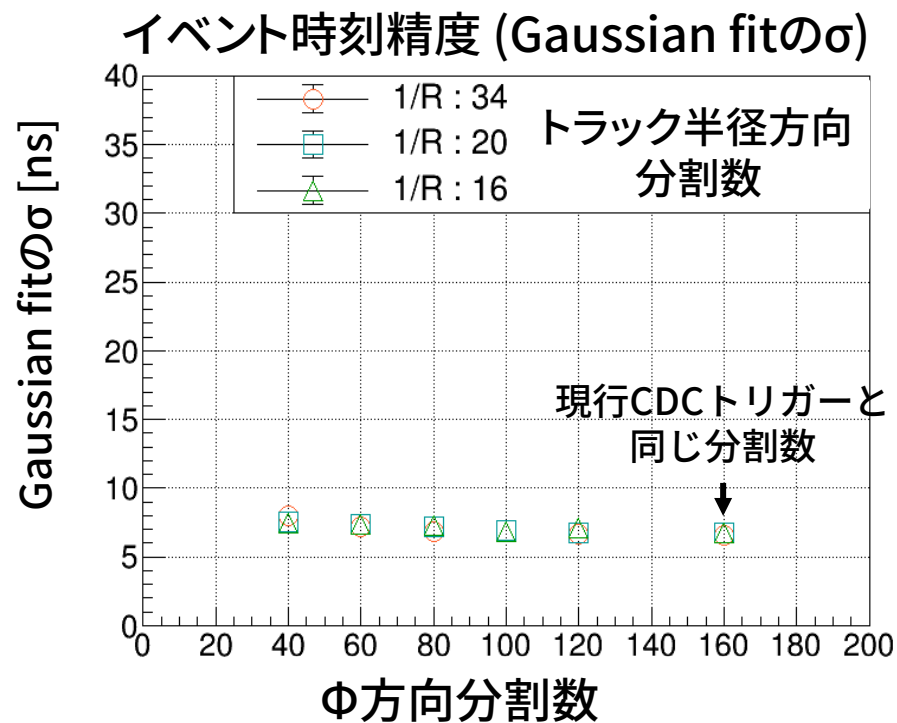
## ハドロン事象



# 飛跡精度が精度に与える影響

- Hough平面となるトラックのパラメータ空間( $\Phi, 1/R$ )上での分割数を減らすことでFPGAのリソースを大きく削減することができるが**飛跡検出の精度が悪化**する。
- トラック由来ではないヒットを選びやすくなり、イベント時刻から大きく外れたhitが精度悪化を招いている。

メッシュサイズ削減を行った場合においても $\sigma$ で10 ns以下の時間分解能が達成可能でありFPGAリソースの猶予に応じてさらなる向上が見込まれる。



# CDC ETF実装の準備状況

## トリガー用汎用ボードのアップグレード

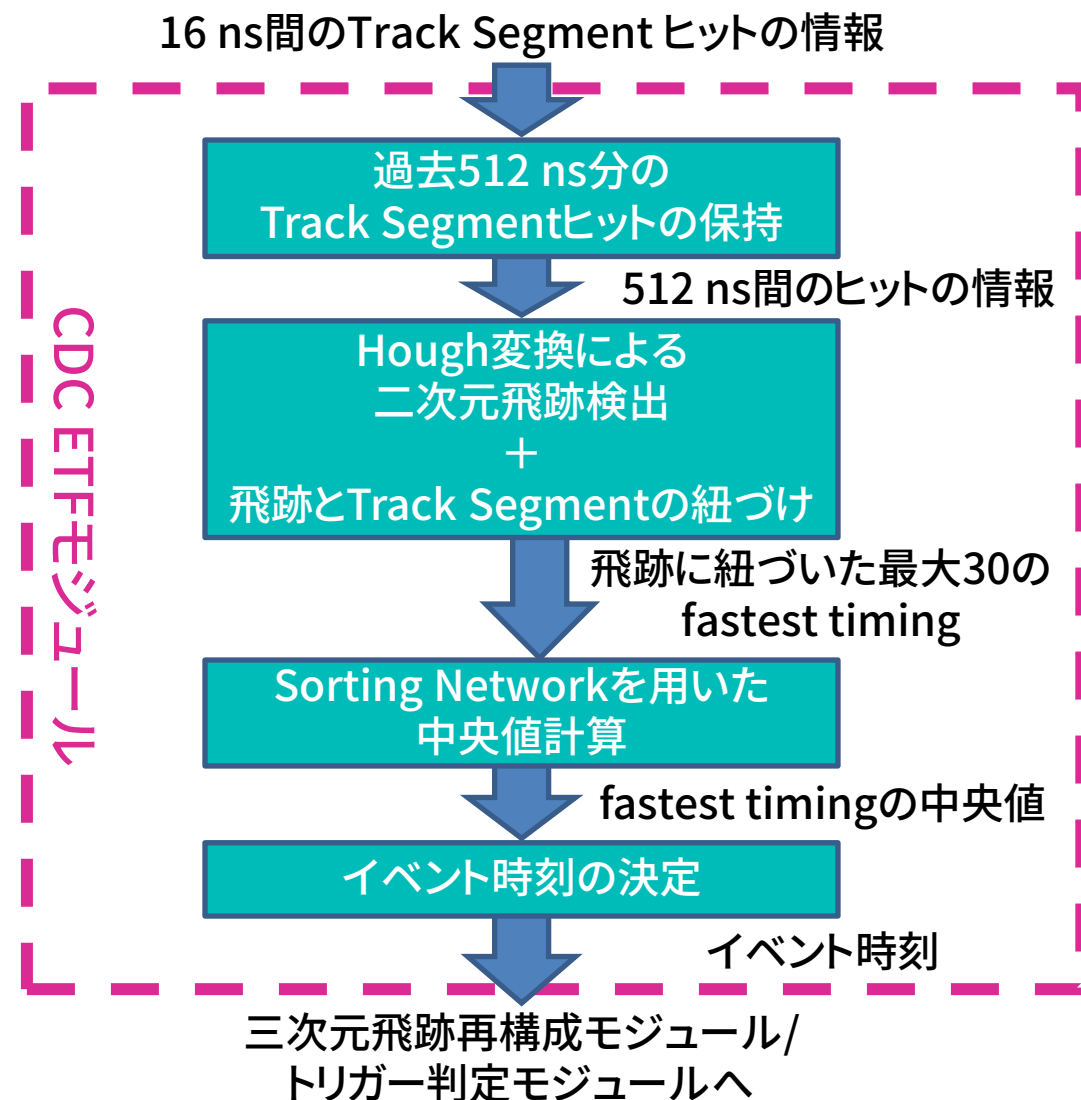
現行のトリガーシステム用ボード  
Universal Trigger board 3 (UT3)のアップグレードとして、  
Virtex UltraScale FPGAを搭載した  
Universal Trigger board 4 (UT4)にETFを実装すべく開発中。

## CDC ETFの開発状況

- 二次元飛跡検出ロジックの動作確認
- 中央値計算によるイベント時刻決定
- 入出力部の実装
- 宇宙線を用いた実入力テスト
- 衝突データを用いた性能評価

2020年秋物理データ取得からの本格導入を目指す。

## CDC ETFロジックの構成



# まとめ

---

- Belle II実験のハードウェアトリガーにおけるイベント時刻検出精度向上のために、中央飛跡検出器トリガーの新しいトリガーモジュールを開発中である。
- Hough変換二次元飛跡検出を用いたイベント時刻検出をFPGAに実装する。
- シミュレーションによる性能評価ではfastest timingの中央値を用いることでガウシアンフィットの $\sigma$ で**8.5 ns** (ミューオン対事象), **5.7 ns** (ハドロン事象)を**高効率**で達成可能となる。
- 現在はメインロジックをテスト段階であり、2020年秋物理データ取得からの本格導入を目指す。